

PATENT ABSTRACTS OF JAPAN

(11)Publication number : 2003-255169

(43)Date of publication of application : 10.09.2003

(51)Int.Cl.

G02B 6/22

G02B 6/10

G02F 1/35

H01S 3/06

H01S 3/10

H01S 3/30

(21)Application number : 2002-057482

(71)Applicant : FURUKAWA ELECTRIC CO LTD:THE

(22)Date of filing : 04.03.2002

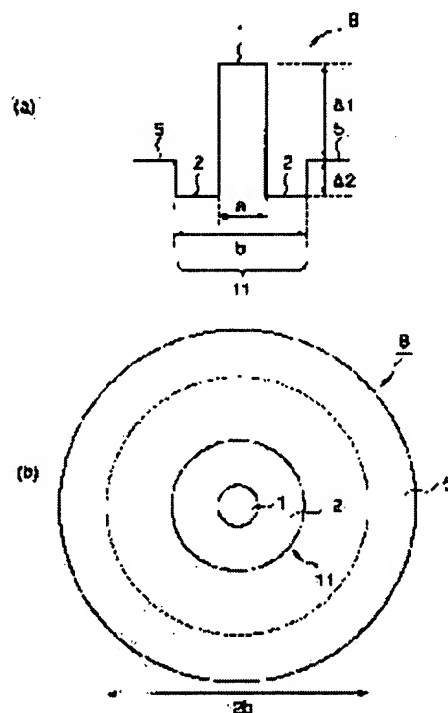
(72)Inventor : SUGIZAKI RYUICHI
MUKASA KAZUNORI
KUMANO NAOMI
YAGI TAKESHI

(54) OPTICAL FIBER, OPTICAL TRANSMISSION LINE USING THE OPTICAL FIBER, AND OPTICAL TRANSMISSION LINK

(57)Abstract:

PROBLEM TO BE SOLVED: To form an optical transmission line for broadband wavelength-division multiplex transmission using a Raman amplifier.

SOLUTION: Settings are made, i.e., the absolute value of dispersion in the entire wavelength band of 1,360 to 1,625 nm being 0.5 to 9 ps/nm/km, the absolute value of a dispersion slope at a 1,550 nm wavelength being ≤ 0.03 ps/nm²/km, the diameter of a mode field at the 1,550 nm wavelength being ≤ 7 μ m, and the cutoff wavelength of a cable being $\leq 1,360$ nm. The outer circumferential side of a core 11 is covered with a clad 5 and has a 1st core layer 1 formed at the center part of an optical fiber and a 2nd core layer 2 covering the outer circumferential side of the 1st core layer 1. The specific refractive index difference $\Delta 1$ based upon the clad 5 of the 1st core layer is set to 0.6 to 1.6% and the specific refractive index difference $\Delta 2$ based upon the clad 5 of the 2nd core layer 2 is set minus.



LEGAL STATUS

[Date of request for examination]

[Date of sending the examiner's decision of rejection]

[Kind of final disposal of application other than the examiner's decision of rejection or

application converted registration]

[Date of final disposal for application]

[Patent number]

[Date of registration]

[Number of appeal against examiner's decision of rejection]

[Date of requesting appeal against examiner's decision of rejection]

[Date of extinction of right]

(19) 日本国特許庁 (J P)

(12) 公開特許公報 (A)

(11) 特許出願公開番号

特開2003-255169

(P2003-255169A)

(43) 公開日 平成15年9月10日 (2003.9.10)

(51) Int.Cl. ⁷	識別記号	F I	テーマコード* (参考)
G 0 2 B 6/22		G 0 2 B 6/22	2 H 0 5 0
		6/10	C 2 K 0 0 2
G 0 2 F 1/35	5 0 1	G 0 2 F 1/35	5 0 1 5 F 0 7 2
H 0 1 S 3/06		H 0 1 S 3/06	B
		3/10	Z
審査請求 未請求 請求項の数20 O L (全 15 頁) 最終頁に続く			

(21) 出願番号 特願2002-57482 (P2002-57482)

(22) 出願日 平成14年3月4日 (2002.3.4)

(71) 出願人 000005290

古河電気工業株式会社

東京都千代田区丸の内2丁目6番1号

(72) 発明者 杉崎 隆一

東京都千代田区丸の内2丁目6番1号 古河電気工業株式会社内

(72) 発明者 武笠 和則

東京都千代田区丸の内2丁目6番1号 古河電気工業株式会社内

(74) 代理人 100093894

弁理士 五十嵐 清

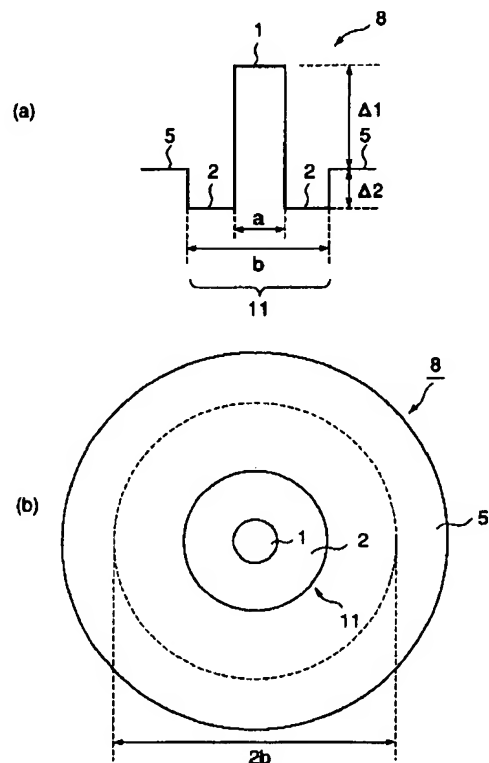
最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 光ファイバおよびその光ファイバを用いた光伝送路ならびに光伝送リンク

(57) 【要約】

【課題】 ラマン増幅器を用いた広帯域の波長分割多重伝送用光伝送路を形成可能とする。

【解決手段】 例えば波長1360nmから1625nmの全域における分散の絶対値を0.5ps/nm/km以上9ps/nm/km以下とし、波長1550nmにおける分散スロープの絶対値を0.03ps/nm²/km以下とし、波長1550nmにおけるモードフィールド径を7μm以下とし、ケーブルカットオフ波長を1360nm未満とする。コア11の外周側をクラッド5で覆い、コア11は少なくとも光ファイバ中心部に形成された第1コア層1と第1コア層1の外周側を覆う第2コア層2を有する構成とする。第1コア層1のクラッド5を基準とした比屈折率差Δ1を0.6%以上1.6%以下とし、第2コア層2のクラッド5を基準とした比屈折率差Δ2を負の値とする。



【特許請求の範囲】

【請求項1】 波長1360nmから1625nmの全域における分散の絶対値を 0.5 ps/nm/km 以上 9 ps/nm/km 以下とし、波長1550nmにおける分散スロープの絶対値を $0.03\text{ ps/nm}^2/\text{km}$ 以下とし、波長1550nmにおけるモードフィールド径を $7\mu\text{m}$ 以下とし、ケーブルカットオフ波長を1360nm未満としたことを特徴とする光ファイバ。

【請求項2】 波長1430nmから1625nmの全域における分散の絶対値を 0.5 ps/nm/km 以上 9 ps/nm/km 以下とし、波長1550nmにおける分散スロープの絶対値を $0.04\text{ ps/nm}^2/\text{km}$ 以下とし、波長1550nmにおけるモードフィールド径を $7\mu\text{m}$ 以下とし、ケーブルカットオフ波長を1430nm未満としたことを特徴とする光ファイバ。

【請求項3】 波長1550nmにおける分散スロープの絶対値を $0.03\text{ ps/nm}^2/\text{km}$ 以下としたことを特徴とする請求項2記載の光ファイバ。

【請求項4】 波長1550nmにおける伝送損失を 0.25 dB/km 以下としたことを特徴とする請求項1または請求項2または請求項3記載の光ファイバ。

【請求項5】 波長1390nmにおける伝送損失を 1.0 dB/km 以下としたことを特徴とする請求項1または請求項2または請求項3記載の光ファイバ。

【請求項6】 水素環境下における波長1390nmの損失増加を10%以下にしたことを特徴とする光ファイバ。

【請求項7】 水素環境下における波長1390nmの損失増加を10%以下にしたことを特徴とする請求項1乃至請求項5のいずれか一つに記載の光ファイバ。

【請求項8】 偏波モード分散を $0.5\text{ ps}/\sqrt{\text{km}}$ 以下としたことを特徴とする請求項1乃至請求項7のいずれか一つに記載の光ファイバ。

【請求項9】 偏波モード分散を $0.2\text{ ps}/\sqrt{\text{km}}$ 以下としたことを特徴とする請求項1乃至請求項7のいずれか一つに記載の光ファイバ

【請求項10】 コアの外周側をクラッドで覆って形成され、前記コアは少なくとも光ファイバ中心部に形成された第1コア層と該第1コア層の外周側を覆う第2コア層を有しており、前記第1コア層の前記クラッドを基準とした比屈折率差を 0.6% 以上 1.6% 以下とし、前記第2コア層の前記クラッドを基準とした比屈折率差を負の値としたことを特徴とする請求項1乃至請求項9のいずれか一つに記載の光ファイバ。

【請求項11】 ホストガラスを石英により形成し、第1コア層には少なくともゲルマニウムをドーピングし、第2コア層には少なくともフッ素をドーピングして形成したことを特徴とする請求項10記載の光ファイバ。

【請求項12】 ホストガラスを石英により形成し、第1コア層には少なくともゲルマニウムとフッ素をドーピング

し、第2コア層には少なくともフッ素をドーピングして形成したことを特徴とする請求項10記載の光ファイバ。

【請求項13】 第1コア層のフッ素ドーピング量と第2コア層のフッ素ドーピング量をほぼ同一量としたことを特徴とする請求項12記載の光ファイバ。

【請求項14】 第1コア層と第2コア層を同時に合成したことを特徴とする請求項10乃至請求項13のいずれか一つに記載の光ファイバ。

【請求項15】 クラッドは第2コア層との境界から第2コア層の直径の2倍の領域に至る範囲を第1コア層と第2コア層と同時に合成したことを特徴とする請求項14記載の光ファイバ。

【請求項16】 請求項1乃至請求項15の光ファイバのうち正の分散を有する光ファイバと負の分散を有する光ファイバをそれぞれ1本以上組み合わせて形成したことを特徴とする光伝送路。

【請求項17】 波長1460nmから1625nmまでの範囲内の設定波長または設定波長域または全波長域において光伝送路の平均分散値をほぼ零としたことを特徴とする請求項16記載の光伝送路。

【請求項18】 信号光の送信側から受信側にかけて光ファイバを複数縦続接続して形成し、前記複数の光ファイバのうち最もモードフィールド径が大きい光ファイバは信号光受信側に最も近い位置を除く位置に設けたことを特徴とする請求項17記載の光伝送路。

【請求項19】 波長1460nmから1625nmの範囲内の設定波長域または全波長域における平均分散値を -1.0 ps/nm/km 以上 1.0 ps/nm/km 以下としたことを特徴とする光伝送リンク。

【請求項20】 信号光源と、該信号光源から出力される信号光と異なる波長の励起光を出力する励起光源とを光伝送路に接続して形成したことを特徴とする光伝送リンク。

【発明の詳細な説明】

【0001】

【発明の属する技術分野】本発明は、ラマン増幅に最適な光ファイバおよびその光ファイバを用いた光伝送路ならびに光伝送リンクに関するものである。

【0002】

【背景技術】情報社会の発展により、通信情報量が飛躍的に増大する傾向にあり、このような情報の増大化に伴い、波長分割多重伝送が通信分野に広く受け入れられている。波長分割多重伝送は、複数の波長の光を1本の光ファイバで伝送する方式である。

【0003】現在、波長分割多重伝送の中継箇所に適用される光増幅器として、エルビウム添加ファイバを用いた光増幅器(EDFA)が開発され、用いられている。このような光ファイバ型の光増幅器の開発により、前記中継箇所において波長ごとに光信号を電気信号に変換することが不要になったことが、波長分割多重伝送の発展

を加速させている。

【0004】また、その一方で、最近では、ラマン増幅を用いたラマン増幅器が新しい光増幅器として注目されている。ラマン増幅は、ラマン散乱における誘導放出を利用して光を増幅する方式であり、その利用効率は、光ファイバの非線形性に大きく依存する。一般に、光ファイバの非線形性が大きいほどラマン増幅の効率は高くなる。

【0005】図7には、ラマン増幅を利用した光伝送システムの一例が示されている。同図において、信号光源4a1~4anは、それぞれ互いに異なる波長の信号光を出力する。それぞれの信号光源4a1~4anから出力された信号光は光合波器15により合波される。

【0006】また、励起光源3a1~3anは、それぞれ互いに異なる波長の励起光を出力する。一般に、励起光源3a1~3anには、多モードで発振する励起光源が用いられる。それぞれの励起光源3a1~3anから出力された励起光は光合波器16により合波される。これらの励起光と前記信号光（波長多重信号光）は光合波器10によって合波され、光伝送路を形成する光ファイバ8に入力される。

【0007】光ファイバ8に入力された波長多重信号光はラマン増幅されながら光ファイバ8中を伝搬していき、光の受信側に設けられた光分波器9で波長ごとに各信号光に分波され、光受信機7a1~7anで受信される。

【0008】図7に示す光伝送システムは、ラマン増幅のための励起光を光ファイバ8の前方（信号光の入力側と同じ方向）から入力する前方向励起システムの一例である。ラマン増幅器を用いた光伝送システムの別の例として、図8に示すように、ラマン増幅のための励起光を光ファイバ8の後方（信号光が出力される方向）から入力する後方向励起がある。

【0009】同図において、それぞれの励起光源13a1~13anから出力された励起光は光合波器26により合波される。励起光は信号光の進行方向と逆向きに伝搬し、光ファイバ8を伝搬してくる信号光に光合波器20によって合波される。

【0010】また、ラマン増幅器を用いた光伝送システムのさらに別の例として、図9に示すように、ラマン増幅のための励起光を光ファイバ8の前方と後方の両方から入力する双方向励起がある。

【0011】同図において、それぞれの励起光源3a1~3anから出力された励起光は光合波器16により合波され、それぞれの励起光源13a1~13anから出*

$$\Delta\beta = \beta_1 + \beta_2 - \beta_3 - \beta_{\text{fwm}}$$

$$\approx \frac{\pi \lambda^4}{c^2} D_s \{ (f_1 - f_0) + (f_2 - f_0) \} (f_1 - f_3) (f_2 - f_3)$$

【0019】ここで、 β は伝搬定数、 c は光の速度、 λ は波長、 D_s は光ファイバ8の分散スロープ、 f_1 、 f

* 力された励起光は光合波器26により合波される。これらの励起光は光合波器10、20によって信号光と合波され光ファイバ8を伝搬する。光ファイバ8の長手方向の光強度分布をより均一にするためには、双方向励起を適用することが好ましい。

【0012】光ファイバ8が石英系で作製されている場合、ラマン増幅の最大の利得ピークは、励起光の光周波数より13THz低い周波数（約100~110nm長波長側）に存在する。つまり、励起光によって、励起光波長から約100~110nm長波長側の信号光が増幅される。

【0013】したがって、例えば波長1.5 μ m帯域の光伝送システムでは、1580nmの信号光が最大のラマン利得を得るためには、励起光を1480nmの波長にする必要がある。また、波長分割多重伝送システムにおいては、波長多重される信号光の波長域のうち短波長側の信号光を短波長側の励起光でラマン増幅し、長波長側の信号光を長波長側の励起光でラマン増幅する。

【0014】

【発明が解決しようとする課題】ところで、図10の特性線aに示すように、光ファイバ8の零分散波長が信号光 S_{i-n} と励起光 R_{i-m} との間に存在する場合には、信号光 S_{i-n} の近傍に四光波混合 F_{i-p} が発生することが知られている。また、四光波混合が発生する光周波数を f_{fwm} とし、信号光 S_{i-n} もしくは励起光 R_{i-m} の光周波数を f_i 、 f_j 、 f_k としたとき、 $f_{\text{fwm}} = f_i + f_j - f_k$ であることが知られている。ここで、 $i \neq k$ 、 $i \neq j$ である。

【0015】発生した四光波混合 F_{i-p} の光強度は発生効率 η に比例し、発生効率 η は（数1）で表されることが知られている。以上のことは、例えば、MARI W. MAEDA, J. Lightwave Technology, vol.8, no.9, pp.1402, 1990に記載されている。

【0016】

【数1】

$$\eta = \frac{\alpha^2}{\alpha^2 + \Delta\beta^2} \left(1 + \frac{4e^{-\alpha} \sin^2\left(\frac{\Delta\beta L}{2}\right)}{(1 - e^{-\alpha})^2} \right)$$

【0017】ここで、 α は光ファイバ8の損失、 L は光ファイバ8の長さである。 $\Delta\beta$ は四光波混合の位相整合条件を表しており、（数2）により与えられる。

【0018】

【数2】

j 、 f_k (ただし、 $i \neq k$ 、 $i \neq j$) は信号光 S_{i-n} もしくは励起光 R_{i-m} の光周波数、 f_0 は光ファイバ8の零分散波長を周波数に換算したものである。なお、四光波混合の発生現象は、信号光と励起光が光ファイバ8中を同方向に伝搬する場合に顕著であり、(数2)の近似は信号光と励起光が光ファイバ8中を同方向に伝搬する場合の近似である。

【0020】(数1)と(数2)から、光ファイバ8の零分散波長が信号光 S_{i-n} と励起光 R_{i-m} の間にあるときには信号光 S_{i-n} と励起光 R_{i-m} で発生する四光波混合 F_{i-p} の発生効率が大きくなることが分かる。

【0021】上記のように、四光波混合 F_{i-p} が発生すると、信号光 S_{i-n} の伝送特性が劣化し、特に、四光波混合の発生効率 η が大きくなると、四光波混合に搾取される励起光の光強度も大きくなり、信号光は大きなラマン利得を得られない。

【0022】さらに、信号光と励起光で発生する四光波混合の発生効率は、特に信号光と励起光とが光ファイバ8中を同方向に伝搬する場合に大きくなるので、双方向励起が不可能となり、最適な光伝送システムを構築できないといった問題を招く。

【0023】したがって、ラマン増幅波長分割多重伝送を実現するためには、光ファイバ8に発生する四光波混合を抑制することが重要な課題の一つとなる。

【0024】なお、現在、波長分割多重伝送は、例えばエルビウムドープ光ファイバ型光増幅器により、主にCバンドと呼ばれる波長1530nmから1565nmを中心に行われているが、波長分割多重伝送の波長域を波長1530nmから1625nmの範囲に広げる検討が行われている。なお、波長1565nmから1625nmの範囲はLバンドと呼ばれている。

【0025】CバンドとLバンドの2つのバンドを使用したラマン伝送路を構築するためには、伝送帯域の最短波長よりも100nm程度低いところに励起光を入力する必要がある、1530nmよりも100nm短波長の1430nm以上1625nm以下の範囲内に零分散波長を有していない光ファイバとすることにより、四光波混合を抑制することが考えられる。

【0026】また、Sバンドと呼ばれる波長1460nmから1530nmにおいて波長分割多重伝送を実現できるようにする要求も強く、Sバンドを含めたS、C、Lの3つのバンド伝送を実現するためには、波長1360nm以上1625nm以下の範囲内に零分散波長を持たない光ファイバ8を形成することが望ましい。

【0027】また、ラマン増幅を適用した波長分割多重伝送システムを実現するためには、上記四光波混合の抑制に加え、光ファイバ8の分散スロープ、実効コア断面積、伝送損失、OH基に伴う吸収損失、偏波モード分散等を的確な値にする必要がある。

【0028】例えば分散スロープが大きいと分散による波形歪みが生じることになり、実効コア断面積が大きいと、十分なラマン増幅効率が得られない。また、伝送損失が大きいと長距離伝送に支障が生じることになり、偏波モード分散が大きいと、特に高速伝送(高速通信)の際に偏光方向による信号光の遅延時間の差が大きくなって、信号光伝送に悪影響を与えるといった問題が生じる。

【0029】さらに、OH基に伴う吸収損失は、例えば励起光が波長1390nm付近の光を含む場合に、十分なラマン増幅効率が得られないため、波長分割多重伝送の広帯域化に影響を与える。

【0030】しかしながら、上記条件を満足できる光ファイバは、従来提案されていないために、高品質、広帯域のラマン増幅波長分割多重伝送システムを構築することができなかった。

【0031】例えば、一般的なシングルモード光ファイバ(SMF)は、波長1360nm以上1625nm以下の範囲内に零分散波長を持たないので、上記四光波混合の問題を回避することができるが、シングルモード光ファイバは、ラマン利得の大きさに関与する n_2/A_{eff} が比較的小さいため、伝送路の損失を十分補償できるほどのラマン利得を得ることができない。なお、 n_2 はカー係数 A_{eff} は実効コア断面積ある。

【0032】例えば、図11に示すように、光ファイバの損失とラマン利得を等しくするには、 n_2/A_{eff} を $4.4 \times 10^{-10} / W$ 以上にしなければならないが、同図の斜線領域に示すように、シングルモード光ファイバはこの条件を満たすことができない。

【0033】また、シングルモード光ファイバは、波長1.5μm帯域において約 $+17 ps/nm/km$ の大きな波長分散を有している。そのため、波長1.5μm帯の信号光はこの大きな波長分散の影響を受けて、パルス広がりによる符号間非線形効果が起こるため、ラマン増幅を適用する波長分割多重伝送にシングルモード光ファイバを用いることは好ましくない。

【0034】例えば、図12には、光ファイバの分散の絶対値と分散によるパルス広がりとの関係が示されている。Tはビットレートの逆数、tはパルスの四光波混合周波数である。t/Tが0.4以下ならば符号間の重なりが小さく、符号間非線形効果は許容できる。

【0035】このことから、10Gbps以上のシステムでは信号光が受ける光ファイバの分散の絶対値は約 $9 ps/nm/km$ 以下でなければならないが、図の斜線領域に示すように、シングルモード光ファイバは分散が $17 ps/nm/km$ 程度であり、t/Tが0.4を越えてしまう。したがって、シングルモード光ファイバを光伝送路として適用することは好適でない。

【0036】本発明は、上記課題を解決するためになされたものであり、その目的は、四光波混合を抑制可能

で、波長分散の絶対値や分散スロープの絶対値が小さく、効率的にラマン増幅可能であり、好ましくは、伝送損失、偏波モード分散が小さい、ラマン増幅適用の波長分割多重伝送に適した光ファイバおよびその光ファイバを用いた光伝送路ならびに光伝送システムを提供することにある。

【0037】

【課題を解決するための手段】上記目的を達成するために、本発明は次のような構成をもって課題を解決するための手段としている。すなわち、第1の発明の光ファイバは、波長1360nmから1625nmの全域における分散の絶対値を0.5ps/nm/km以上9ps/nm/km以下とし、波長1550nmにおける分散スロープの絶対値を0.03ps/nm²/km以下とし、波長1550nmにおけるモードフィールド径を7μm以下とし、ケーブルカットオフ波長を1360nm未満とした構成をもって課題を解決する手段としている。

【0038】また、第2の発明の光ファイバは、波長1430nmから1625nmの全域における分散の絶対値を0.5ps/nm/km以上9ps/nm/km以下とし、波長1550nmにおける分散スロープの絶対値を0.04ps/nm²/km以下とし、波長1550nmにおけるモードフィールド径を7μm以下とし、ケーブルカットオフ波長を1430nm未満とした構成をもって課題を解決する手段としている。

【0039】さらに、第3の発明の光ファイバは、上記第2の発明の構成に加え、波長1550nmにおける分散スロープの絶対値を0.03ps/nm²/km以下とした構成をもって課題を解決する手段としている。

【0040】さらに、第4の発明の光ファイバは、上記第1または第2または第3の発明の構成に加え、波長1550nmにおける伝送損失を0.25dB/km以下とした構成をもって課題を解決する手段としている。

【0041】さらに、第5の発明の光ファイバは、上記第1または第2または第3の発明の構成に加え、波長1390nmにおける伝送損失を1.0dB/km以下とした構成をもって課題を解決する手段としている。

【0042】さらに、第6の発明の光ファイバは、水素環境下における波長1390nmの損失増加を10%以下にした構成をもって課題を解決する手段としている。

【0043】さらに、第7の発明の光ファイバは、上記第1乃至第5のいずれか一つの発明の構成に加え、水素環境下における波長1390nmの損失増加を10%以下にした構成をもって課題を解決する手段としている。

【0044】さらに、第8の発明の光ファイバは、上記第1乃至第7のいずれか一つの発明の構成に加え、偏波モード分散を0.5ps/√km以下とした構成をもって課題を解決する手段としている。

【0045】さらに、第9の発明の光ファイバは、上記

第1乃至第7のいずれか一つの発明の構成に加え、偏波モード分散を0.2ps/√km以下とした構成をもって課題を解決する手段としている。

【0046】さらに、第10の発明の光ファイバは、上記第1乃至第9のいずれか一つの発明の構成に加え、コアの外周側をクラッドで覆って形成され、前記コアは少なくとも光ファイバ中心部に形成された第1コア層と該第1コア層の外周側を覆う第2コア層を有しており、前記第1コア層の前記クラッドを基準とした比屈折率差を0.6%以上1.6%以下とし、前記第2コア層の前記クラッドを基準とした比屈折率差を負の値とした構成をもって課題を解決する手段としている。

【0047】さらに、第11の発明の光ファイバは、上記第10の発明の構成に加え、ホストガラスを石英により形成し、第1コア層には少なくともゲルマニウムをドーピングし、第2コア層には少なくともフッ素をドーピングして形成した構成をもって課題を解決する手段としている。

【0048】さらに、第12の発明の光ファイバは、上記第10の発明の構成に加え、ホストガラスを石英により形成し、第1コア層には少なくともゲルマニウムとフッ素をドーピングし、第2コア層には少なくともフッ素をドーピングして形成した構成をもって課題を解決する手段としている。

【0049】さらに、第13の発明の光ファイバは、上記第12の発明の構成に加え、前記第1コア層のフッ素ドーピング量と第2コア層のフッ素ドーピング量をほぼ同一量とした構成をもって課題を解決する手段としている。

【0050】さらに、第14の発明の光ファイバは、上記第10乃至第13のいずれか一つの発明の構成に加え、前記第1コア層と第2コア層を同時に合成した構成をもって課題を解決する手段としている。

【0051】さらに、第15の発明の光ファイバは、上記第14の発明の構成に加え、クラッドは第2コア層との境界から第2コア層の直径の2倍の領域に至る範囲を第1コア層と第2コア層と同時に合成した構成をもって課題を解決する手段としている。

【0052】さらに、第16の発明の光伝送路は、上記第1乃至第15のいずれか一つの発明の光ファイバのうち正の分散を有する光ファイバと負の分散を有する光ファイバをそれぞれ1本以上組み合わせ形成した構成をもって課題を解決する手段としている。

【0053】さらに、第17の発明の光伝送路は、上記第16の発明の構成に加え、波長1460nmから1625nmまでの範囲内の設定波長または設定波長域または全波長域において光伝送路の平均分散値をほぼ零とした構成をもって課題を解決する手段としている。

【0054】さらに、第18の発明の光伝送路は、上記第17の発明の構成に加え、信号光の送信側から受信側にかけて光ファイバを複数縦続接続して形成し、前記複数の光ファイバのうち最もモードフィールド径が大きい

10

20

30

40

50

光ファイバは信号光受信側に最も近い位置を除く位置に設けた構成をもって課題を解決する手段としている。

【0055】さらに、第19の発明の光伝送リンクは、波長1460nmから1625nmの範囲内の設定波長域または全波長域における平均分散値を -1.0ps/nm/km 以上 1.0ps/nm/km 以下とした構成をもって課題を解決する手段としている。

【0056】さらに、第20の発明の光伝送リンクは、上記第19の発明の構成に加え、信号光源と、該信号光源から出力される信号光と異なる波長の励起光を出力する励起光源とを光伝送路に接続して形成した構成をもって課題を解決する手段としている。

【0057】

【発明の実施の形態】以下、本発明の実施形態例を図面にに基づき説明する。図1には本発明に係る光ファイバの第1実施形態例の屈折率分布プロファイルが示されている。光ファイバの屈折率分布のプロファイルとしては、様々な形態の屈折率プロファイルのものとすることが可能であるが、本実施形態例では、構造が比較的単純で、屈折率構造の設計、制御がしやすい、図1の(a)に示すような屈折率プロファイルを採用している。

【0058】本実施形態例の光ファイバは、コア11の外周側をクラッド5で覆って形成され、前記コア11は少なくとも光ファイバ中心部に形成された第1コア層と該第1コア層の外周側を覆う第2コア層2を有している。前記第1コア層1の前記クラッド5を基準とした比屈折率差 $\Delta 1$ は0.6%以上1.6%以下、前記第2コア層2の前記クラッド5を基準とした比屈折率差 $\Delta 2$ は負の値としている。第1コア層1の直径はa、第2コア層2の直径はbである。

【0059】なお、本明細書においては、第1コア層の屈折率最大部の屈折率を $n1$ 、第2コア層の屈折率最小部の屈折率を $n2$ 、クラッドの屈折率を $n5$ としたとき、上記各比屈折率差 $\Delta 1$ 、 $\Delta 2$ を以下の(数3)、(数4)の近似式により定義している。

【0060】

【数3】

$$\Delta 1 \equiv \{ (n1 - n5) / n5 \} \times 100$$

【0061】

【数4】

$$\Delta 2 \equiv \{ (n2 - n5) / n5 \} \times 100$$

【0062】表1には、本実施形態例の光ファイバの試作例1~14の構成が示されており、それぞれの光ファイバは、上記各比屈折率差 $\Delta 1$ 、 $\Delta 2$ の値を表1に示す値としている。これら $\Delta 1$ 、 $\Delta 2$ の単位は%である。また、第1コア層1のゲルマニウム(Ge)のドーパ量を $\Delta 1(\text{Ge})$ で示しており、第1コア層1のフッ素(F)のドーパ量を $\Delta 1(\text{F})$ で示している。

【0063】

【表1】

No.	$\Delta 1$ (Ge)	$\Delta 1$ (F)	$\Delta 1$ Total	$\Delta 2$	a μm	b μm	分散 (1360nm) ps/nm/km	分散 (1430nm) ps/nm/km	分散 (1625nm) ps/nm/km	分散 λ^2 - γ (1550nm) $\text{ps/nm}^2/\text{km}$	伝送損失 (1390nm) dB/km	伝送損失 (1550nm) dB/km	MFD (1550nm) μm	PMD $\text{ps}/\sqrt{\text{km}}$	n_2/n_5 $10^{-10}/\text{km}$	曲げ 損失 dB/m	カットオフ 波長 nm
1	0.60	-	0.60	-0.45	6.1	14.1	0.51	4.13	6.92	0.009	0.612	0.202	6.30	0.19	8.6	4.8	890
2	0.60	-	0.60	-0.30	6.4	13.8	-1.07	2.79	8.57	0.026	0.651	0.206	6.79	0.08	7.4	3.7	916
3	0.70	-	0.70	-0.30	4.9	16.8	-3.04	0.88	7.96	0.033	0.668	0.208	6.08	0.11	9.9	2.2	936
4	0.70	-	0.70	-0.40	5.7	11.9	-0.62	3.05	8.29	0.023	0.664	0.211	6.11	0.15	9.8	1.1	982
5	0.70	-	0.70	-0.40	5.2	12.1	-0.46	-3.01	-5.86	-0.002	0.697	0.207	5.99	0.13	10.1	4.3	870
6	0.90	-	0.90	-0.40	4.4	11.7	-8.73	-6.10	-5.74	-0.003	0.717	0.222	5.40	0.42	14.0	1.6	896
7	1.00	-	1.00	-0.40	4.4	11.8	-8.90	-6.03	-3.36	0.009	0.728	0.234	5.19	0.35	16.0	0.7	926
8	0.80	-	0.80	-0.40	4.9	11.9	-5.98	-3.20	-2.37	-0.001	0.674	0.211	5.68	0.04	12.0	3.2	820
9	1.20	-	1.20	-0.55	5.0	12.4	-3.31	0.59	7.53	0.032	0.810	0.236	4.90	0.03	19.8	0.5	1010
10	1.40	-	1.40	-0.55	4.6	10.9	-2.42	1.31	7.89	0.080	0.880	0.242	4.60	0.15	24.5	0.2	1118
11	1.60	-	1.60	-0.55	4.7	11.1	-2.79	1.11	8.32	0.034	0.950	0.247	4.43	0.18	28.7	0.1	1166
12	1.10	-0.40	0.70	-0.40	5.8	11.9	-0.60	3.12	8.43	0.024	0.490	0.212	6.01	0.19	12.5	0.9	996
13	1.05	-0.45	0.60	-0.45	6.0	14.0	0.52	4.14	7.06	0.009	0.460	0.215	6.27	0.22	11.2	4.7	902
14	1.05	-0.45	0.60	-0.45	6.1	14.1	0.53	4.08	7.11	0.009	0.460	0.216	6.29	0.18	11.2	4.9	889

【0064】また、表1において、aは第1コア層1の直径、bは第2コア層2の直径を示している。分散は、カッコ内の波長における波長分散であり、MFDは波長1550nmにおけるモードフィールド径、PMDは偏波モード分散、曲げ損失は波長1550nmにおける20mmφの曲げ損失である。カットオフ波長はケーブルカットオフ波長を示し、光ファイバの長さ22mでのカットオフ波長である。

【0065】本実施形態例の光ファイバのホストガラスは石英である。つまり、本実施形態例の光ファイバは石英系ガラスにより形成されている。実施形態例の光ファイバ8の一例は、第1コア層1が少なくともゲルマニウムをドープして形成され、第2コア層2が少なくともフッ素をドープして形成されている。この構成例の光ファイバ8は、例えば、表1のNo. 1～No. 11に示す試作例1～11の光ファイバである。

【0066】また、本実施形態例の光ファイバの別の例は、第1コア層1が少なくともゲルマニウムとフッ素をドープして形成され、第2コア層2が少なくともフッ素をドープして形成されている。この例の光ファイバ8は、例えば、表1のNo. 12～No. 14に示す試作例12～14の光ファイバである。これらの構成例において、第1コア層1のフッ素ドープ量と第2コア層2のフッ素ドープ量をほぼ同一量としている。

【0067】表1のNo. 1～No. 14で示す試作例1～14のように、本実施形態例の光ファイバは、いずれも、波長1550nmにおける伝送損失を0.25dB/km以下としている。

【0068】伝送損失は、長距離伝送路として例えば80km伝送路を用いた場合、伝送路での損失を20dB以内に抑えるためには0.25dB/km以下でなければならない。ラマン増幅を行うので多少の損失はカバーできるが、雑音の発生等を考慮すると、信号領域での損失は0.25dB/km以内に押さえる必要がある。

【0069】本実施形態例の光ファイバは、上記のように、波長1550nmにおける伝送損失を0.25dB/km以下としているので、波長1550nmを中心とした波長域における雑音発生等を抑制できる。

【0070】また、本実施形態例の光ファイバは、波長1390nmにおける伝送損失を1.0dB/km以下としている。

【0071】光ファイバには波長1390nm付近にOH基に起因する吸収損失があることが知られており、この損失は、光ファイバをCバンドで使用しているときはそれほど大きな問題にならないが、Sバンドを用いる場合には問題となる。

【0072】つまり、Sバンドを用いたラマン増幅用の光伝送路に光ファイバを適用する場合、波長1390nm付近は励起光波長帯と重なるので、波長1390nm付近に吸収損失があると、励起光のロスが発生してしまう。波長1390nmにおける損失が1dBを越える光ファイバは励起光の損失が大きく、高価な光源と大きな電力を要してしまい、コスト的に問題がある。

【0073】本実施形態例の光ファイバは、波長1390nmにおける伝送損失を1.0dB/km以下としているので、Sバンドを用いたラマン増幅用の光伝送路に光ファイバを適用しても、波長1390nmにおける損失の影響によって生じる励起光損失を抑制できる。

【0074】また、本実施形態例の光ファイバは、水素環境下における波長1390nmの損失増加が10%以下となるようにしている。つまり、光ファイバを1%の水素濃度雰囲気下に96時間放置したときの波長1390nmの損失増加が10%以下となるようにしている。なお、本明細書においては、水素環境下における損失増加は、上記のことを意味する。

【0075】従来は、ケーブル内に発生した水素により波長1390nmの損失が10%以上増加すると、光伝送路に入力する励起光パワーを増やさなければシステムダウンにつながるという問題があったが、本実施形態例は、水素環境下における波長1390nmの損失増加が10%以下となるようにしているので、この問題を回避できる。

【0076】また、試作例1～14の光ファイバは、いずれも、偏波モード分散を0.5ps/√kmとしている。

【0077】偏波モード分散は高速伝送の妨げとなることが知られており、偏波モード分散の値が、一般的な光ファイバケーブルと同様に、0.5ps/√km以内でなければ、偏波モード分散補償無しでの高速伝送は不可能であることが知られている。

【0078】本実施形態例の光ファイバは、いずれも、偏波モード分散を0.5ps/√km以下としているので、偏波モード分散による悪影響を抑制し、たとえ偏波モード分散補償無しでも高速伝送を可能とする。

【0079】特に、表1のNo. 1～5、8～12、14に示す試作例1～5、8～12、14の光ファイバは、偏波モード分散を0.2ps/√km以下としているので、偏波モード分散による悪影響をより一層抑制し、偏波モード分散補償無しでも、40GB/sクラスの高速度伝送を可能とする。

【0080】また、試作例1の光ファイバ（表1のNo. 1の光ファイバ）は、波長1360nmから1625nmの全域における波長分散を正の値とし、かつ、分散の絶対値を0.5ps/nm/km以上9ps/nm/km以下としており、この広い波長域において零分散波長を有していない。

【0081】つまり、試作例1の光ファイバは、例えば図2の(a)の特性線aに示すように、波長1460nmから1625nmの信号光S_{1～m}を励起する励起光R_{1～m}の最短波長R₁（ここでは1360nm）よりも短波長側に零分散波長を有する構成である。

【0082】試作例1の光ファイバは、上記のように、1360nmよりも短波長側に零分散波長を有しているので、波長SバンドからLバンドに至る広い波長範囲（波長1460nmから1625nm）において、四光波混合による効率低下を生じることなく、効率的に、ラマン増幅適用の波長分割多重伝送を行うことができる。

【0083】また、試作例1の光ファイバは、波長13

60 nmから1625 nmの全域における波長分散の絶対値を 9 ps/nm/km 以下としているので、分散による信号光のパルス広がりを抑制でき、符号間非線形効果を低減できる。

【0084】さらに、試作例1の光ファイバは、波長1550 nmにおける分散スロープの絶対値を $0.03 \text{ ps/nm}^2/\text{km}$ 以下、波長1550 nmにおけるモードフィールド径を $7 \mu\text{m}$ 以下、ケーブルカットオフ波長を1360 nm未満としている。

【0085】試作例1の光ファイバは、上記のように、ケーブルカットオフ波長を1360 nm未満としているので、励起光や信号光のシングルモード条件を満足させることができる。

【0086】また、ラマン増幅を適用して 40 Gb/s 程度の高速の波長分割多重伝送を行う場合、例えば光伝送路として適用される光ファイバの単位長さあたりの分散がそれほど大きくななくとも、その累積分散が 60 ps/nm を越えると波形劣化が激しくなるため、分散補償は必須となる。

【0087】広帯域伝送を目的とした場合は、単一の分散補償器で広帯域に分散補償することが望ましい。しかし、広帯域さに利点がある分散補償光ファイバも、急峻な分散スロープを実現するのは難しく、所望の分散と分散スロープの比(DPS; Dispersion/Slope)を200 (nm)以下にするのは難しい。

【0088】したがって、例えば分散の絶対値が $8 \sim 9 \text{ ps/nm/km}$ の光ファイバを光伝送路に用いる場合は、その光ファイバの分散スロープの絶対値は $0.04 \text{ ps/nm}^2/\text{km}$ で分散と同符号であることが望ましく、さらに、分散絶対値を $4 \sim 6 \text{ ps/nm/km}$ 程度に低減した光ファイバを光伝送路に用いる場合は、その光ファイバの分散スロープの絶対値は同符号で $0.03 \text{ ps/nm}^2/\text{km}$ 以下とすることが望ましい。

【0089】試作例1の光ファイバの波長1550 nmにおける分散スロープの絶対値は $0.009 \text{ ps/nm}^2/\text{km}$ であり、上記条件を満足でき、非常に広い範囲で分散変化が少なく、分散補償しやすい光ファイバを実現できている。

【0090】また、実効コア断面積は、モードフィールド径と一義的に対応しており、実効コア断面積が大きすぎると、十分なラマン増幅効率が得られない。ITU-T勧告G.653の分散シフト光ファイバ(DSF)は、モードフィールド径が $7.8 \sim 8.5 \mu\text{m}$ とされており、このモードフィールド径を有する光ファイバの実効コア断面積は最小で $48 \mu\text{m}^2$ 程度である。

【0091】トレランスを考慮して、この分散シフト光ファイバと差別化したラマン利得を得るためには、光ファイバ8の実効コア断面積を $40 \mu\text{m}^2$ 以下とすることが好ましい。この実効コア断面積に対応するモードフィールド径は、 $7 \mu\text{m}$ 以下である。

【0092】試作例1の光ファイバは、波長1550 nmにおけるモードフィールド径を $7 \mu\text{m}$ 以下としているので、上記分散シフト光ファイバよりも効率的にラマン増幅を行え、好適な波長分割多重伝送を実現できる。

【0093】次に、試作例2～4の光ファイバ(表1のNo. 2～4の光ファイバ)と試作例9～11(表1のNo. 9～11の光ファイバ)について説明する。これらの光ファイバは、波長1430 nmから1625 nmの全域における分散の絶対値を0.5以上9以下としており、この広い波長域において零分散波長を有していない。

【0094】つまり、試作例2～4、9～11の光ファイバは、例えば図2の(b)の特性線aに示すように、波長1530 nmから1625 nmの信号光 S_{in} を励起する励起光 R_{in} の最短波長 R_1 (ここでは1430 nm)よりも短波長側に零分散波長を有する構成である。

【0095】また、試作例2～4、9～11の光ファイバは、波長1550 nmにおける分散スロープの絶対値を $0.04 \text{ ps/nm}^2/\text{km}$ 以下、波長1550 nmにおけるモードフィールド径を $7 \mu\text{m}$ 以下、ケーブルカットオフ波長を1430 nm未満としている。

【0096】これらの試作例の中で、試作例2、4、10の光ファイバは、波長1550 nmにおける分散スロープの絶対値を $0.03 \text{ ps/nm}^2/\text{km}$ 以下としている。また、特に、試作例4の光ファイバは、分散スロープの絶対値が小さいので、広帯域において分散変化が少なく、分散補償しやすい光ファイバを実現できている。

【0097】試作例2～4、9～11の光ファイバは、CバンドとLバンドの波長域において、試作例1と同様の効果を奏することができ、ラマン増幅を適用してCバンドとLバンドの波長域において高品質の波長分割多重伝送を実現することができる。

【0098】試作例5～8の光ファイバ(表1のNo. 5～8の光ファイバ)は、波長1430 nmから1625 nmの全域における波長分散を負の値とし、かつ、分散の絶対値を0.5以上9以下としており、この広い波長域において零分散波長を有していない。

【0099】つまり、試作例5～8の光ファイバは、例えば図3の特性線aに示すように、信号光 S_{in} の最長波長 S_2 (ここでは1625 nm)よりも長波長側に零分散波長を有する構成である。

【0100】また、試作例5～8の光ファイバは、波長1360 nmから1625 nmの全域における波長分散の絶対値を 9 ps/nm/km 以下としているので、分散による信号光のパルス広がりを抑制でき、符号間非線形効果を低減できる。

【0101】さらに、試作例5～8の光ファイバは、波長1550 nmにおける分散スロープの絶対値を0.0

3 ps/nm²/km以下、波長1550 nmにおけるモードフィールド径を7 μm以下、ケーブルカットオフ波長を1360 nm未満としている。

【0102】試作例5～8の光ファイバの波長1550 nmにおける分散スロープの絶対値は、いずれも0.009 ps/nm²/km以下であり、非常に広い範囲で分散変化が少なく、分散補償しやすい光ファイバを実現できている。

【0103】試作例5～8の光ファイバは、試作例1の光ファイバと同様の効果を奏することができる。

【0104】図4の特性線aは、上記試作例1の波長分散特性を示しており、同図の特性線bは試作例5の波長分散特性を示している。これらの特性線a、bに示すように、試作例1、5の光ファイバは、いずれも、励起光波長の最短波長である1360 nmから信号光波長の最長波長である1625 nmにかけて、零分散となる波長が無く、四光波混合を確実に抑制できる。

【0105】さらに、表1に示した全試作例において、波長1550 nmにおける20 mmφの曲げ損失は5 dB/m以下である。光ファイバがこの値を有していれば、SバンドからLバンドに至る範囲において使用可能な光ファイバケーブルを構成できることが知られており、試作例1～14の光ファイバは、広い波長域において曲げによる損失の小さい光ファイバケーブルを構成できる。

【0106】なお、本発明者は、本実施形態例の光ファイバの屈折率プロファイルを決定するに際し、様々な検討を行った。そして、図1のように、比屈折率差Δ2を負の値とすることにより、分散スロープの絶対値が低減された光ファイバを実現できることが分かった。

【0107】また、比屈折率差Δ1について検討を行ったところ、比屈折率差Δを0.6%未満にすると波長1550 nmにおけるモードフィールド径を7 μm以下にできず、比屈折率差Δ1を1.6%より大きくすると、波長1550 nmにおける伝送損失が0.25 dB/kmより大きくなってしまったことが分かった。

【0108】そこで、上記のように、比屈折率差Δ1を0.6%以上1.6%以下とし、比屈折率差Δ2を負の値として、本実施形態例の光ファイバの屈折率プロファイルを決定し、例えば表1に示した各試作例の光ファイバを試作した。

【0109】また、本発明者は、光ファイバの合成方法を様々に検討し、以下に示す構成を本実施形態例のより好ましい例として決定した。つまり、その第1の構成例は、第1コア層1と第2コア層2は同時に合成されていることを特徴とする。第2の構成例は、クラッド5は第2コア層2との境界から第2コア層2の直径bの2倍の領域に至る範囲（例えば図1の（b）の破線枠CL内）を第1コア層1と第2コア層2と同時に合成されていることを特徴とする。

【0110】上記好ましい構成例は、表1において、N

o. 13で示す試作例13とNo. 14で示す試作例14であり、試作例13が第1の構成例、試作例14が第2の構成例である。

【0111】試作例13、14は、いずれも、上記試作例1と同じ屈折率プロファイルを有している。ただし、試作例1は、第1コア層1と第2コア層2を互いに独立に合成して形成されており、試作例13は、第1コア層1と第2コア層2を同時に合成して形成されている。また、試作例14は、第1コア層1と第2コア層2と、クラッド5における第2コア層2との境界から第2コア層2の直径の2倍の領域に至る範囲を同時に合成して形成されている。

【0112】試作例13、14のような構成を適用すると、コア11内に界面を持たないのでOH基による損失を低減でき、波長1390 nmにおける伝送損失を低減できる。なお、波長1390 nmにおける伝送損失の値は、試作例1の光ファイバにおける値であっても問題のないレベルであるが、試作例13、14の光ファイバにおける値とする方がより好ましい。

【0113】また、試作例14の光ファイバは、クラッド5の一部までコア11と共に合成しているので、波長1390 nmにおける伝送損失の値をより小さくできる。

【0114】さらに、試作例1と試作例14とを比較した場合、モードフィールド径がほぼ同じであるにもかかわらず、 n_2/A_{eff} が異なる。試作例14は、第1コア層1にゲルマニウムとフッ素を共ドーピングしているので、第1コア層1の屈折率が等しい試作例1に比べ、第1コア層1のドーパント濃度が高く、 n_2 が大きい。したがって、試作例14の n_2/A_{eff} が試作例1の n_2/A_{eff} に比べて大きくなり、ラマン利得係数の増大効果を発揮できる。

【0115】次に、本発明に係る光伝送路の第1実施形態例について説明する。第1実施形態例の光伝送路は、表1に示した試作例1の光ファイバと試作例7の光ファイバを縦続接続して形成されている。試作例1の光ファイバを信号光の送信側に設け、試作例7の光ファイバを信号光の受信側に設けており、試作例1の光ファイバの長さ L_1 と試作例7の長さ L_2 の比は、1:1.6である。

【0116】累積分散という観点では、正の分散値の光ファイバと負の分散値の光ファイバを正の分散を有する光ファイバと負の分散を有する光ファイバをそれぞれ1本以上組み合わせて光伝送路を形成することが望ましく、第1実施形態例の光伝送路はこの構成を適用している。

【0117】図5には、この光伝送路の平均分散特性が示されている。なお、光伝送路における平均分散値は励起光波長域には影響がないので、信号光波長範囲である1460 nm～1625 nmで議論すればよい。図5に示すように、波長1550 nmにおける平均分散は零に

なっている。

【0118】また、第1実施形態例の光伝送路は、波長1460nm～1625nmの範囲内の設定波長域（ここでは全波長域）における平均分散値を -1.0ps/nm/km 以上 1.0ps/nm/km 以下としている。波長1460nmにおける分散値が -1ps/nm/km であり、波長1625nmまでの全波長域において、分散値が $+1\text{ps/nm/km}$ 以下である。

【0119】このように、第1実施形態例の光伝送路は、S、C、Lバンドの全ての領域で、分散の絶対値が 1ps/nm/km 以下であり、S、C、Lバンドの全ての領域で分散による波形歪みを抑制できる波長分割多重伝送用の光伝送路を実現できる。

【0120】したがって、この光伝送路を適用することにより、波長1460nmから1625nmの範囲内の設定波長域（ここでは全波長域）における平均分散値を -1.0ps/nm/km 以上 1.0ps/nm/km 以下とした光伝送リンクを形成できる。

【0121】この光伝送リンクは、例えば図7～図9に示したように、信号光源と、該信号光源から出力される信号光と異なる波長の励起光を出力する励起光源とを光伝送路に接続して形成するものであり、前方向励起、後方向励起、双方向励起のいずれも適用できる。

【0122】なお、第1実施形態例の光伝送路は、上記設定波長域を全波長域としたが、設定波長域はアプリケーションで用いる波長域のみとしてもよく、このように部分的に設定した設定波長域または設定波長の分散値の絶対値が 1ps/nm/km 以下となるように光伝送路を形成してもよい。

【0123】また、複合伝送路に後方励起のラマン増幅を適用する場合、ラマン利得の小さいものを信号光受信側に設けると利得が得られにくい。このため、光伝送路を形成する複数の光ファイバのうち、モードフィールド径が最大の光ファイバは、信号光受信側に最も近い位置を除く位置に設けることがよい。

【0124】図6には、本発明に係る光伝送路の第2実施形態例の平均分散特性が示されている。この光伝送路は、上記試作例1の光ファイバと、シングルモード光ファイバの分散補償用の分散補償光ファイバとを、長さ比12:1で組み合わせて形成されている。

【0125】第2実施形態例の光伝送路に適用した分散補償光ファイバは、波長1460nmにおける分散値が -72ps/nm/km 、波長1550nmにおける分散値が -80ps/nm/km 、波長1625nmにおける分散値が -94ps/nm/km である。

【0126】第2実施形態例の光伝送路は波長1460nmから1625nmの範囲内の設定波長域（ここでは全波長域）における平均分散値を -1.0ps/nm/km 以上 1.0ps/nm/km 以下としており、上記第1実施形態例の光伝送路と同様の効果を奏することが

できる。また、第2実施形態例の光伝送路を適用した光伝送リンクも上記第1実施形態例の光伝送路を適用した光伝送リンクと同様の効果を奏する。

【0127】なお、第2実施形態例の光伝送路において、最大分散は、 $+0.96\text{ps/nm/km}$ （波長1540nmにおける値）、最小分散は -0.92ps/nm/km （波長1625nmにおける値）である。

【0128】なお、本発明は上記各実施形態例の光ファイバ、光伝送路に限定されることはなく様々な実施の態様を採り得る。例えば、本発明の光ファイバは、上記実施形態例に示した以外の屈折率プロファイルを有していてもよい。

【0129】本発明の光ファイバは、波長1360nmから1625nmの全域における分散の絶対値、波長1550nmにおける分散スロープの絶対値、モードフィールド径、ケーブルカットオフ波長を適宜設定することにより、SバンドからLバンドにかけての広い波長域において、ラマン増幅適用の波長分割多重伝送を高品質で行うことができる。

【0130】また、本発明の光ファイバは、波長1430nmから1625nmの全域における分散の絶対値、波長1550nmにおける分散スロープの絶対値を $0.04\text{ps/nm}^2/\text{km}$ 以下とし、波長1550nmにおける分散スロープの絶対値、モードフィールド径、ケーブルカットオフ波長を適宜設定することにより、CバンドからLバンドにかけての広い波長域において、ラマン増幅適用の波長分割多重伝送を高品質で行うことができる。

【0131】さらに、本発明の光伝送路は、上記第1、第2の実施形態例に限定されるものではなく、本発明の光ファイバのうち、正の分散を有する光ファイバと負の分散を有する光ファイバをそれぞれ1本以上組み合わせで適宜形成されるものである。

【0132】さらに、本発明の光伝送リンクは、波長1460nmから1625nmの範囲内の設定波長域における平均分散値を -1.0ps/nm/km 以上 1.0ps/nm/km 以下とすればよく、前記設定波長域は波長1460nmから1625nmの範囲内の一部の波長域としてもよい。

【0133】さらに、上記例では光ファイバおよび光伝送路ならびに光伝送リンクを、ラマン増幅器を用いた波長分割多重伝送に適用する例を述べたが、本発明の光ファイバおよび光伝送路ならびに光伝送リンクは、ラマン増幅器以外の、例えばエルビウムドープ光ファイバ型光増幅器を用いた波長分割多重伝送にも適用できるものである。

【0134】

【発明の効果】第1の発明の光ファイバによれば、波長1460nmから1625nmにおいて、四光波混合による効率低下を生じることなく、効率的にラマン増幅適

用の波長分割多重伝送を行うことができるし、分散による信号光のパルス広がりを抑制でき、符号間非線形効果を低減できるので、高品質の波長分割多重伝送を実現することができる。

【0135】また、第2の発明の光ファイバによれば、波長1530nmから1625nmにおいて、上記第1の発明の光ファイバと同様の効果を奏することができ、高品質の波長分割多重伝送を実現することができる。

【0136】さらに、第3の発明の光ファイバによれば、第2の発明の効果に加え、分散スロープの絶対値を $0.03 \text{ ps/nm}^2/\text{km}$ 以下とすることにより、より一層分散補償しやすい光ファイバを得ることができる。

【0137】さらに、本発明の光ファイバにおいて、波長1550nmにおける伝送損失を 0.25 dB/km 以下とした構成によれば、信号光波長における伝送損失を抑制できるので、良好な長距離伝送を行うことができる。

【0138】さらに、本発明の光ファイバにおいて、波長1390nmにおける伝送損失を 1.0 dB/km 以下とした構成によれば、ラマン増幅において信号光波長域を波長1460nm程度まで短波長側に拡大したときに、励起光が波長1390nmにおける損失の影響を受けて増幅効率の低下が生じることを抑制でき、効率的なラマン増幅適用の波長分割多重伝送を実現できる。

【0139】さらに、水素環境下における波長1390nmの損失増加を10%以下にした本発明の光ファイバは、水素環境下における波長1390nmの損失増加を抑制することにより、ラマン増幅において信号光波長域を波長1460nm程度まで短波長側に拡大したときに、励起光が波長1390nmにおける損失の影響を受けて増幅効率の低下が生じることを抑制でき、効率的なラマン増幅適用の波長分割多重伝送を実現できる。

【0140】さらに、本発明の光ファイバにおいて、偏波モード分散を $0.5 \text{ ps}/\sqrt{\text{km}}$ 以下とした構成によれば、特に高速伝送において問題となる偏波モード分散による悪影響を抑制し、たとえ偏波モード分散補償無しでも高速伝送を可能とすることができる。

【0141】さらに、本発明の光ファイバにおいて、偏波モード分散を $0.2 \text{ ps}/\sqrt{\text{km}}$ 以下とした構成によれば、より一層偏波モード分散による悪影響を抑制し、良好な高速伝送を可能とすることができる。

【0142】さらに、本発明の光ファイバにおいて、コアの外周側をクラッドで覆って形成され、前記コアは少なくとも光ファイバ中心部に形成された第1コア層と該第1コア層の外周側を覆う第2コア層を有しており、前記第1コア層の前記クラッドを基準とした比屈折率差を0.6%以上1.6%以下とし、前記第2コア層の前記クラッドを基準とした比屈折率差を負の値とした屈折率プロファイルを有する構成によれば、上記効果を確実に

発揮できる光ファイバを製造性良く実現することができる。

【0143】さらに、本発明の光ファイバにおいて、上記屈折率プロファイルを有し、ホストガラスを石英により形成し、第1コア層には少なくともゲルマニウムをドーピングし、第2コア層には少なくともフッ素をドーピングして形成した構成によれば、上記効果を確実に発揮できる光ファイバをより一層製造性良く実現することができる。

【0144】さらに、本発明の光ファイバにおいて、上記屈折率プロファイルを有し、ホストガラスを石英により形成し、第1コア層には少なくともゲルマニウムとフッ素をドーピングし、第2コア層には少なくともフッ素をドーピングして形成した構成によれば、上記効果を確実に発揮できる光ファイバをより一層製造性良く実現することができるし、第1コア層にゲルマニウムとフッ素をドーピングすることにより、ラマン増幅効率をより一層高めることができる。

【0145】さらに、第1コア層にゲルマニウムとフッ素をドーピングした構成の本発明の光ファイバにおいて、第1コア層のフッ素ドーピング量と第2コア層のフッ素ドーピング量をほぼ同一量とした構成によれば、光ファイバの設計性や製造性をより一層良好にできる。

【0146】さらに、本発明の光ファイバにおいて、第1コア層と第2コア層は同時に合成されている構成によれば、コア内に界面を持たないのでOH基による損失を低減でき、波長1390nmにおける伝送損失を低減できる。

【0147】さらに、本発明の光ファイバにおいて、クラッドは第2コア層との境界から第2コア層の直径の2倍の領域に至る範囲を第1コア層と第2コア層と同時に合成されている構成によれば、コア内に界面を持たないのでOH基による損失を低減でき、クラッドの一部までコアと共に合成することにより、波長1390nmにおける伝送損失の値をより小さくできる。

【0148】さらに、本発明の光伝送路によれば、上記効果を奏する本発明の光ファイバのうち正の分散を有する光ファイバと負の分散を有する光ファイバをそれぞれ1本以上組み合わせ形成することにより、光伝送路全体の分散の絶対値を小さくすることができる。

【0149】さらに、本発明の光伝送路において、波長1460nmから1625nmまでの範囲内の設定波長または設定波長域または全波長域において光伝送路の平均分散値をほぼ零とした構成によれば、上記設定波長または設定波長域において分散による信号光歪をほぼ完全に抑制できる光伝送路を実現できる。

【0150】さらに、本発明の光伝送路において、信号光の送信側から受信側にかけて光ファイバを複数縦続接続して形成し、前記複数の光ファイバのうち最もモードフィールド径が大きい光ファイバは信号光受信側に最も近い位置を除く位置に設けた構成によれば、後方励起の

ラマン増幅を適用する場合に、信号光受信側に最も近い位置にモードフィールド径最大の光ファイバを設ける場合に比べ、良好な利得を得ることができる。

【0151】さらに、本発明の光伝送リンクによれば、波長1460nmから1625nmの範囲内の設定波長域または全波長域における平均分散値を -1.0ps/nm/km 以上 1.0ps/nm/km 以下とすることにより、光伝送リンクにおける分散による信号光歪みを抑制できる。

【0152】さらに、本発明の光伝送リンクにおいて、信号光源と、該信号光源から出力される信号光と異なる波長の励起光を出力する励起光源とを光伝送路に接続して形成した構成によれば、励起光光源から発する励起光によってラマン増幅等の適宜の光増幅を行い、良好な波長多重伝送等の光伝送を行うことができる。

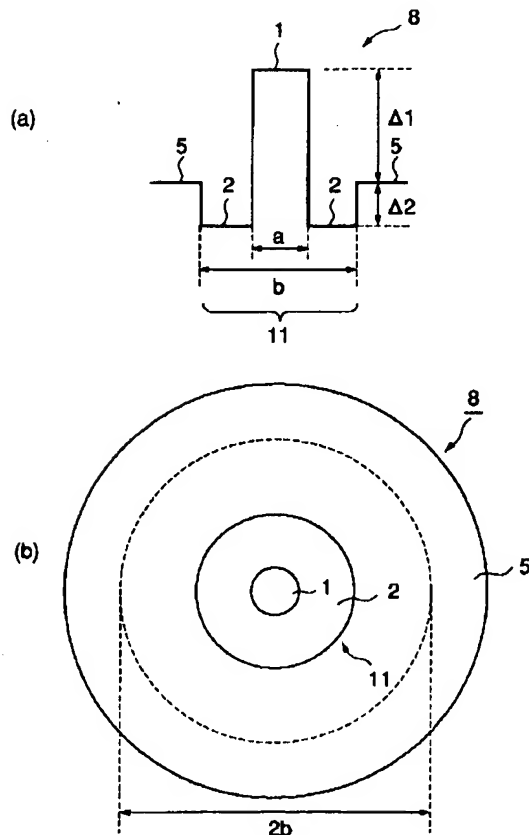
【図面の簡単な説明】

【図1】本発明に係る光ファイバの一実施形態例の屈折率プロファイル構成(a)および光ファイバ断面構成(b)を示す説明図である。

【図2】本発明に係る光ファイバの零分散波長と励起光および信号光の波長との関係例を示す説明図である。

【図3】本発明に係る光ファイバの零分散波長と励起光および信号光の波長との関係の別の例を示す説明図である。

【図1】



*【図4】本発明に係る光ファイバの波長分散特性例を示すグラフである。

【図5】本発明に係る光伝送路の第1実施形態例における波長分散特性を示すグラフである。

【図6】本発明に係る光伝送路の第2実施形態例における波長分散特性を示すグラフである。

【図7】前方向励起のラマン増幅波長分割多重伝送システム例を示す説明図である。

【図8】後方向励起のラマン増幅波長分割多重伝送システム例を示す説明図である。

【図9】双方向励起のラマン増幅波長分割多重伝送システム例を示す説明図である。

【図10】従来の光ファイバの零分散波長と励起光および信号光の波長との関係例を示す説明図である。

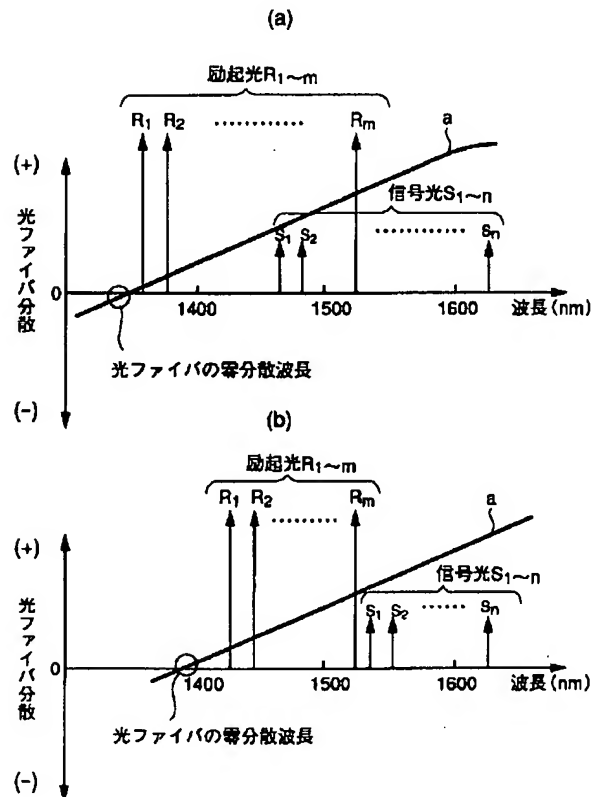
【図11】光ファイバの n_2/A_{eff} と、光ファイバの信号光入出力強度との関係を示すグラフである。

【図12】光ファイバの分散の絶対値と分散によるパルス広がりとの関係を説明するグラフである。

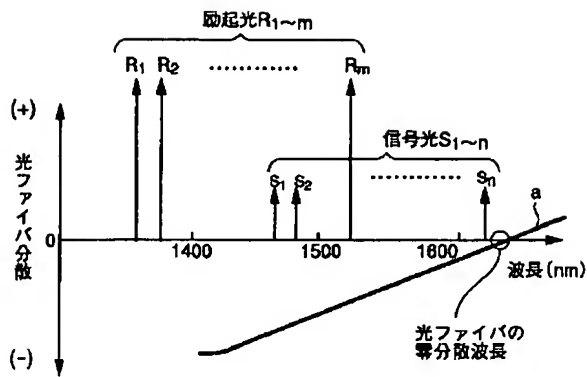
【符号の説明】

- 1 第1コア層
- 2 第2コア層
- 5 クラッド
- 8 光ファイバ
- 11 コア

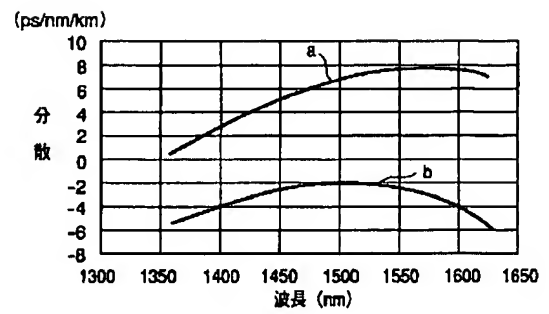
【図2】



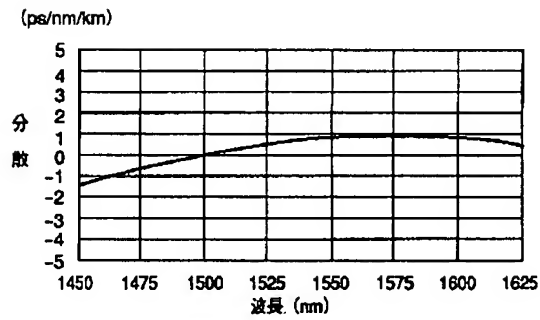
【図3】



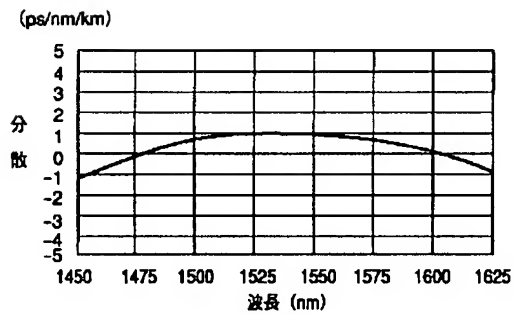
【図4】



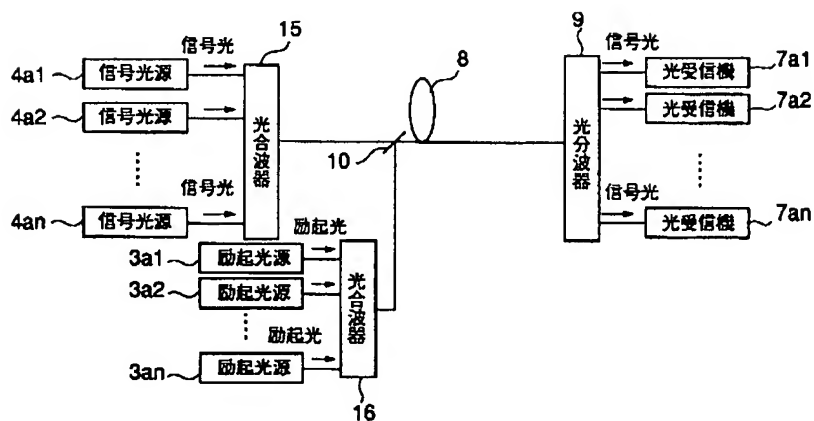
【図5】



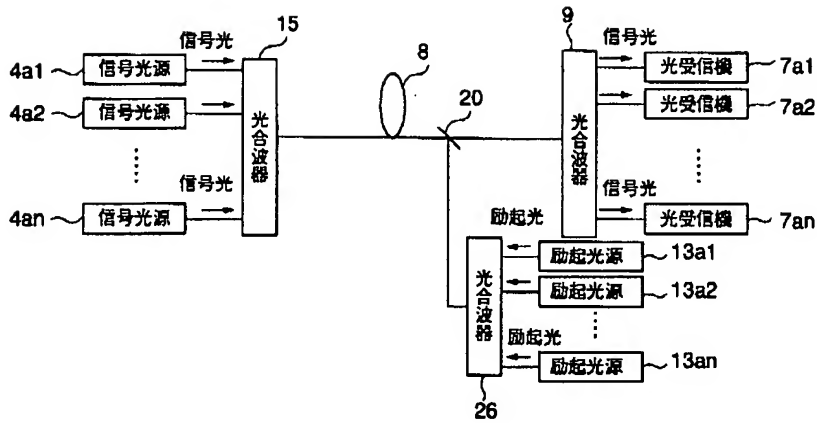
【図6】



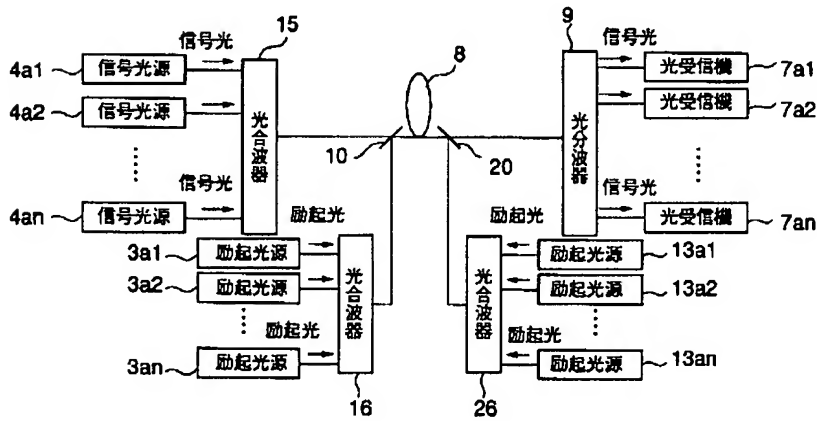
【図7】



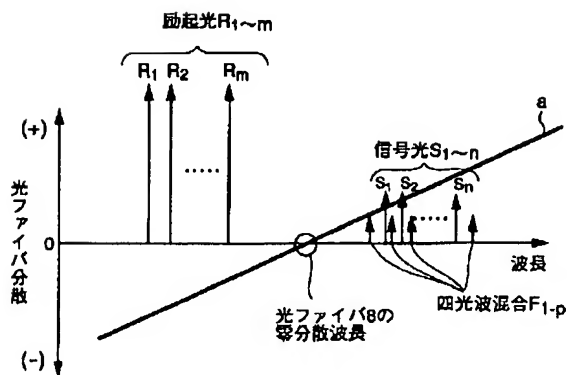
【図8】



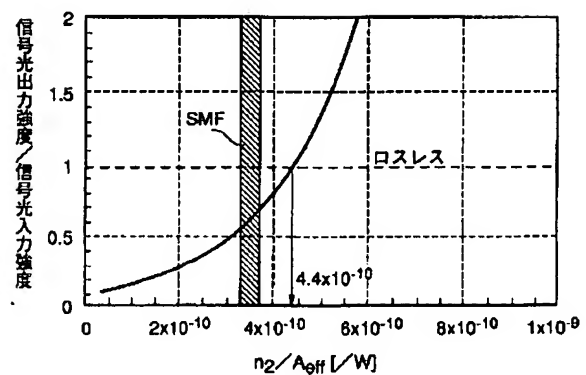
【図9】



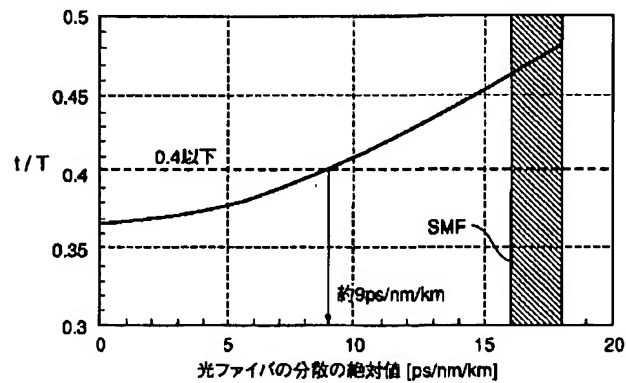
【図10】



【図11】



【図12】



フロントページの続き

(51)Int.Cl.⁷

H01S 3/30

識別記号

F I

H01S 3/30

タームコード(参考)

Z

(72)発明者 熊野 尚美

東京都千代田区丸の内2丁目6番1号 古
河電気工業株式会社内

(72)発明者 八木 健

東京都千代田区丸の内2丁目6番1号 古
河電気工業株式会社内

Fターム(参考) 2H050 AB05X AB10X AC14 AC28

AC73 AC75 AC81 AD00

2K002 AA02 AB30 CA15 DA10 HA23

5F072 AB07 AK06 QQ07 YY17